http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0376

航天器表面污染物质沉积变化和控制因子评估

唐萍[1,2]，朱光武*[1]，秦国泰[1]，李永平[1]，何玉梅[1]
(1. 中国科学院 空间科学与应用研究中心，北京 100190; 2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘 要: 航天器进入空间环境以后，空间环境分子污染和颗粒污染形成了航天器表面污染层，从而对航天器的各技术分系统产生不同的负面影响. 介绍了中外中轨道航天器表面污染物质沉积变化在轨探测结果，并对污染物质沉积量变化和控制因子做初步评估. 结果表明，污染物质沉积量在航天器入轨初期的 1 ~ 2 年内受航天器自身出气物质量、放气速率、表面温度及所处的气流方向等因子所控制. 初期沉积量大，正是受到航天器入轨后自身出气量大、放气速率较高的控制，同时迎风面比背风面沉积量大. 入轨后期表面沉积量长期变化呈现出明显的降变或缓慢涨落，而且具有全向性特征，因此探讨了具有全向性影响能力的控制因子相关特性，其中高能粒子通量和太阳紫外辐射通量变化可能是主要控制因子.

关 键 词: 微质量计; 航天器表面污染; 质量沉积; MSX 卫星; 高能粒子通量
中图分类号: V123.4
文献标识码: A **文章编号:** 1001-5965(2015)05-0891-06

真空环境下，航天器内部和表面所携带的随表面温度变化的出气物质以及航天器推力器调姿调轨产生的分子污染、自身携带上去的微尘以及羽流颗粒污染等污染物质会发生输运、扩散、解吸、分解、光化、氧化等物理和化学过程，沉积在航天器表面，在相应的表面和温度条件下形成沉积层[1-3]. 空间环境中诸多因素[4]（中性原子氧、高能粒子、太阳紫外辐射、空间碎片及微流星等）在与航天器表面相互作用所产生的物质也是形成污染物质沉积层的根源，同时相互作用时溅射、剥蚀等反应也可能是污染物质层耗散的主要控制因子[1-5]. 这种污染物质沉积层会造成航天器一些重要技术分系统（如能源分系统、温控分系统以及光学遥感分系统等）的表面材料性能衰减，效率下降，严重者可产生航天器在轨故障[5-9]，降低航天器在轨使用寿命.

早在 1969 年，美国 OGO-6（Orbiting Geophysical Observatory）航天器上应用石英晶体微量天平（Quartz Crystal Microbalance，QCM）进行了航天器表面污染的在轨监测[10-11]. 此后，石英晶体微量天平被广泛地应用于航天器的在轨污染监测. 1996 年 4 月发射的 MSX（Midcourse Space Experiment）卫星上搭载了多台 QCM，通过长期在轨监测，获得了典型的中轨道（太阳同步轨道）航天器表面污染物质沉积变化数据[12-16]. 2011 年后中国在中轨道航天器上也设置了自行研制“QCM”探测器，同样获得了中轨道航天器表面污染物质沉积变化数据[17].

本文将主要利用中国中轨道航天器表面污染物质探测数据，同时结合美国“MSX”航天器的监测结果，着重探讨中轨道航天器表面污染物质变化及其控制因子评估. 考虑到文中所涉及中轨道航天

收稿日期: 2014-06-23; 录用日期: 2014-08-28; 网络出版时间: 2014-09-29 14:32
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0376.html
基金项目: 空间科学先导专项(XDA04072000); 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA04060202); 国家自然科学基金(41204128)
作者简介: 唐萍(1983—)，女，湖北咸宁人，博士研究生，tangping@nssc.ac.cn
* 通讯作者: 朱光武(1943—)，男，江苏武进人，研究员，zhugw@nssc.ac.cn，主要研究方向为空间探测技术.

引用格式: 唐萍，朱光武，秦国泰，等. 航天器表面污染物质沉积变化和控制因子评估[J]. 北京航空航天大学学报，2015，41(5): 891-896. Tang P，Zhu G W，Qin G T，et al. Changes of contamination deposition on spacecraft surface and evaluation of control factors[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2015，41(5): 891-896 (in Chinese).

器运行高度在800～1200 km，原子氧通量大概在10^{10} atom/(cm^2·s)，相对载人航天轨道高度原子量通量10^{14} atom/(cm^2·s)影响基本可以忽略. 因此对表面污染物质沉积量变化的控制因子评估时，避开了空间环境中原子氧与航天器相互作用的效应机制(包括原子氧对表面材料的剥蚀效应所产生的污染源和对航天器在轨运行中其表面沉积污染物质的剥蚀).

1　数　据

1.1　中轨道航天器表面污染物质沉积量监测数据

1) 中国中轨道航天器"QCM"在轨监测数据.

航天器轨道高度1200 km左右，于2012年5月开始在轨运行. QCM传感器安装在卫星飞行方向侧面，处于背阳面，在轨温度为－10～－5℃，在轨运行状态稳定，迄今在轨运行约2年时间.

2) 美国"MSX"航天器"QCM"在轨监测结果.

航天器轨道高度906 km，于1996年4月份开始在轨运行. QCM传感器安装在卫星迎风面和尾流区，在轨温度约为－50～－40℃，在轨运行状态稳定，一共运行了8年时间[18].

1.2　空间环境数据

选用NASA空间环境中心发布的1996—2013年间质子能量$E>10$ MeV质子日均通量、$F_{10.7}$(太阳10.7 cm射电辐射通量)值数据. 期间正值太阳活动23周双峰高年和2008—2011年太阳活动程度极低水平年份. 两个航天器入轨初期空间环境均处于较为宁静状态.

2　结果与分析

2.1　入轨初期航天器表面污染物质沉积量变化

航天器入轨初期(0～700 d左右)处于空间环境较为宁静期间，太阳活动程度较低，即中性原子氧日均通量值、高能粒子日均通量值以及太阳紫外辐射$F_{10.7}$值均处于较低水平，因此空间环境因素与航天器表面相互作用所产生的污染物质源和对污染物质沉积层的剥蚀作用均会明显降低，而中轨道航天器运行轨道高度较高，相对载人航天轨道原子氧通量低好几个数量级，原子氧的作用和影响明显减弱. 而高能粒子以及太阳紫外辐射等因素应予以重视. Tribble在他的文章中指出"在太阳同步轨道附近产生辐射的主要成分是质子，同时试验证明，1个10 MeV的质子产生的损伤大约相当于3000个1 MeV的电子产生的损伤"[4]. 因此试用$E>10$ MeV质子日均通量探测数据来与航天器表面污染物质沉积量变化作比对分析. 图1和图2分别表示了中国中轨道航天器和美国"MSX"航天器入轨后表面污染物质沉积量的变化.

由图1和图2可知，在空间环境较为宁静期间，中轨道航天器入轨后在轨运行中污染物质沉积量呈现与在轨时间呈正相关关系，即随时间增长沉积量呈增变，增变趋势十分相近. 以在轨运行前17个月(540 d)所累积的污染物质沉积量而言，中国中轨道航天器表面沉积厚度达102.3 nm，而美国"MSX"航天器表面沉积厚度较小仅为13.6 nm.

表1列出了上述两种航天器表面污染物质的沉积速率和监测时QCM传感器晶体表面温度.

由表1可知，两种航天器表面污染物质沉积速率均与在轨时间呈负相关关系，即随在轨时间增加沉积速率逐渐下降，但在此期间QCM传感器晶体表面均比较稳定在负温范围，分别为－10～－5℃和－50～－40℃.

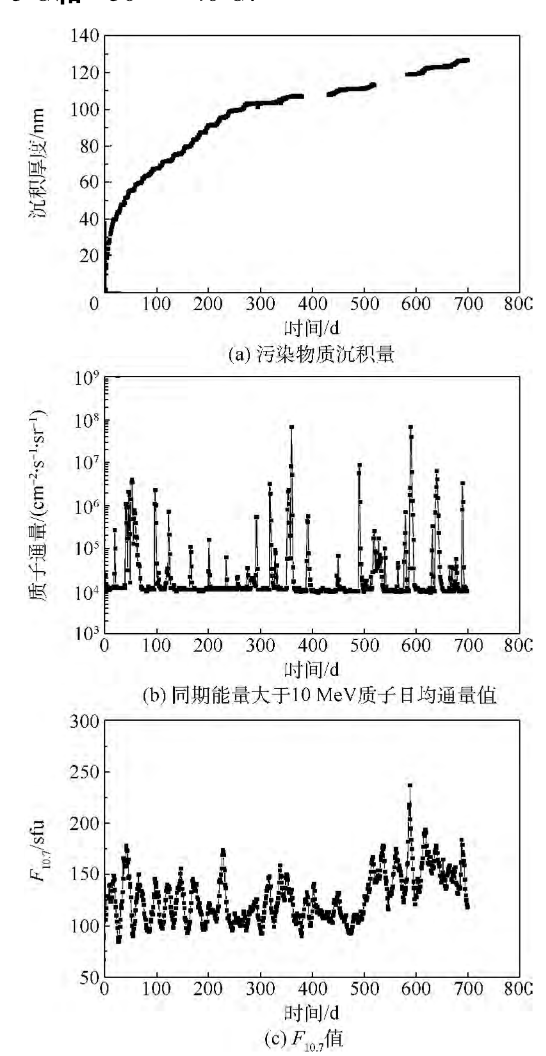


图1　中国中轨道航天器表面污染物质沉积变量变化

Fig. 1　Changes of contamination deposition variables on surface of MEO spacecraft in China

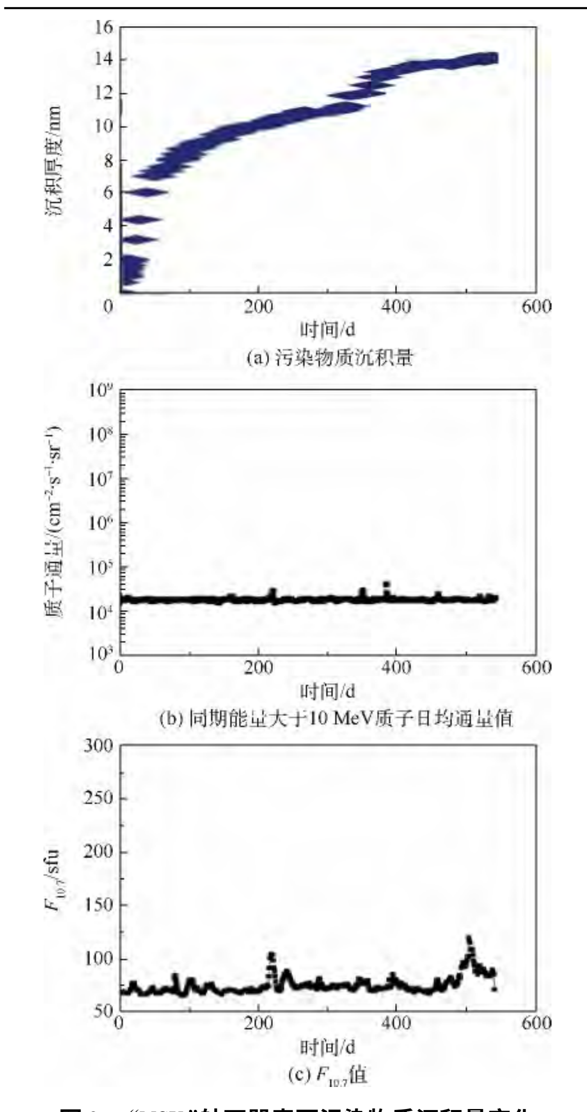


图 2　"MSX"航天器表面污染物质沉积量变化

Fig. 2　Changes of contamination deposition variables on surface of "MSX" spacecraft

表 1　中国中轨道航天器和美国"MSX"航天器表面污染物质沉积速率和 QCM 传感器晶体表面温度变化

Table 1　Contamination deposition rate and surface temperature change of QCM mounted on Chinese MEO spacecraft and American "MSX" spacecraft

航天器	沉积速率/(nm · d⁻¹)			传感器晶体表面温度/℃
	在轨 1 个月	在轨 2 个月	在轨 17 个月	
中国中轨道航天器	1.57	0.393	0.043	-10 ~ -5
美国"MSX"航天器	0.15	0.050	0.012	-50 ~ -40

图 1、图 2 和表 1 表明，在空间环境较为宁静期间入轨的中轨道航天器表面污染物质沉积量变化的主要控制因子是航天器内部和表面材料在真空环境中的出气状况，尤其是挥发性物质的出气率. 在表面温度稳定和飞行状况相近状态下，出气率高则污染物质沉积速率较高，相同时间内航天器表面污染物质沉积厚度愈厚. 随着航天器在轨时间增长，出气率会逐渐下降，相应沉积速率也显著下降.

2.2　入轨长期航天器表面污染物质沉积量变化

太阳活动峰年和峰年向谷年转移期间，中轨道高度范围空间环境通常会处于较高的太阳紫外辐射通量和高能粒子日均通量(质子和电子等) 状态，原子氧通量虽然也有明显增加，但远低于低轨高度的扰动影响. 诸多空间环境因素通过与航天器表面相互作用，不仅能产生污染物质，影响污染程度，而且也会通过溅射、剥蚀等作用来耗散所沉积的污染物质层，由此可能出现沉积量的明显下降. 当航天器表面温度或 QCM 传感器晶体表面维持在稳定的负温范围时，运行在太阳同步轨道及以上高度范围中轨道航天器表面污染物质沉积变化，主要是运行了 400 ~ 600 d 后的长期变化，做了与空间环境中高能质子通量变化的比对分析. "MSX"航天器经历了第 23 次太阳活动周峰年期(1998—1999 年第 1 峰期; 2001—2002 年双峰期) . 图 3 列出了期间航天器表面污染物质沉积量变化、能量大于 10 MeV 质子日均通量值和 $F_{10.7}$ 值的变化.

由图 3(a) 可知，在第 23 太阳活动周第 1 峰期，"MSX"航天器表面沉积污染物质的变化，明显与在轨时间呈负相关关系，即随时间增加，沉积量显著下降. 在此期间表面沉积厚度由 13.6 nm 逐渐下降至 5 nm 左右.

图 3(b) 则表明在此期间，高能质子日均通量值显著上升，最高可高出宁静期间水平 3 个多数量级，考虑到高能质子对污染物质沉积层的溅射作用，同时此时航天器在轨运行已 2 年多，航天器内部和表面材料的出气速率已明显下降，因此期间如果表面温度(即 QCM 传感器晶体表面温度) 保持稳定，则空间环境扰动因素有可能成为航天器表面污染物质沉积量变化的主要控制因子.

2000 年为第 23 周太阳活动双峰年之间较为平静的一年，高能质子通量也明显下降. 由图 3 可知，期间航天器表面污染物质又开始呈现微弱的增变; 2001—2003 年进入双峰年的第 2 个峰期，空间环境扰动程度增长，高能质子通量又进入强增长状态，航天器表面污染物质沉积量进入略有增长的起伏变化，此时这种变化可能是由于多因子综合控制，例如太阳紫外辐射对表面材料的光化反应引起污染源物质的增加，而高能质子的溅射作用又起着耗损污染物质沉积层的作用，使其沉积量降变.

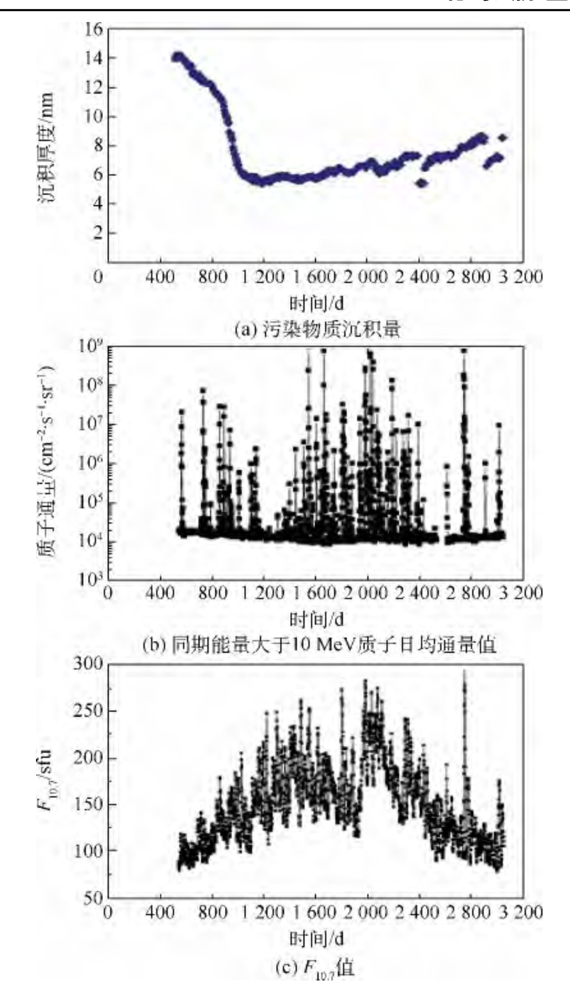


图3 美国"MSX"航天器1998—2005年表面污染物质沉积变量变化

Fig. 3 Changes of contamination deposition variables on surface of "MSX" spacecraft

2.3 在轨长期航天器表面污染物质沉积量变化呈全向性

航天器表面污染物质沉积量变化也与所处气流运动方向相关. 图4(a)和图4(b)分别表示了"MSX"航天器QCM传感器面向气流方向(迎风面)和背向气流方向(尾流区)在空间环境较为宁静期间和扰动期间的表面污染物质沉积量的长期变化. 由图4(a)可知,航天器入轨初期(600 d左右),迎风面QCM监测到的污染物质厚度达13.6 nm,同期尾流区QCM(传感器晶体表面温度相同)监测结果仅为1 nm左右,这表明污染物质沉积量变化的源明显具有方向性,通常尾流区的气体压力要比迎风面小2个数量级左右,因此航天器表面所处气流方向也是沉积量变化的控制因子之一.

由图4(b)可知,空间环境扰动期间,迎风面和尾流区QCM所监测得到的污染物质降变明显呈全向性(即不受气流方向所限),期间耗散厚度均在8 nm左右. 尾流区监测结果出现负耗损的现象,可能与QCM传感器的晶体表面在发射前地面状态下就已经有污染物质沉积层有关. 结果表明表面污染物质质量降变的控制因子也应具有全向性特征,即对航天器迎风面和尾流区表面沉积污染物质的作用和影响能力相近,通常太阳紫外辐射、空间碎片和微流星粒子等对航天器表面污染物质沉积影响均具有方向性,而高能粒子则在空间环境中具有全向性作用.

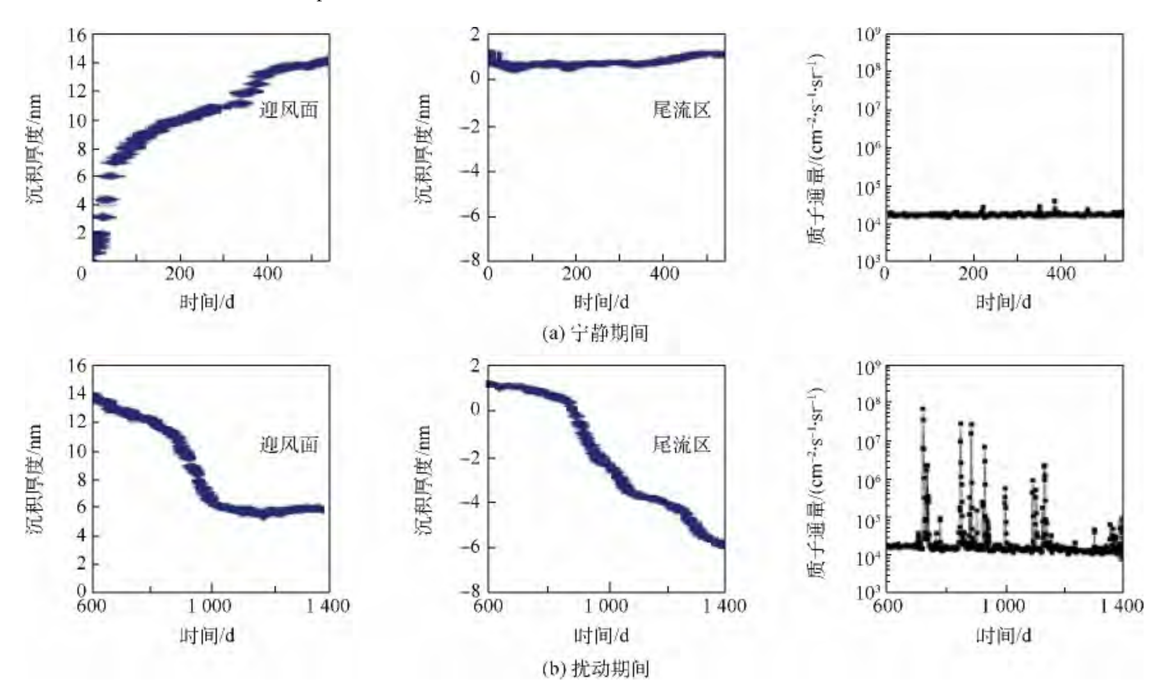


图4 不同空间环境下迎风面和尾流区表面污染物质沉积量的变化

Fig. 4 Changes of contamination deposition on spacecraft surface in the windward and wake position in different space environment

3 结 论

综上结果和分析评估，可以得出以下结论：

1）在空间环境较为宁静期间入轨的中轨道航天器表面污染物质沉积量与在轨时间呈正相关关系，控制这种变化的主要因子是航天器表面和内部材料的出气速率、航天器表面温度和表面所处气流方向．不同航天器会因出气速率不同，而表面污染物质沉积量有显著差异，如航天器在轨运行开始90 d内中国中轨道航天器表面污染物质沉积厚度为99 nm，而美国“MSX”航天器迎风面和尾流区QCM监测结果分别是13.6 nm和1 nm，显然这种变化与航天器出气量、出气速率以及表面所处气流方向有关．

2）空间环境扰动期间，中轨道航天器表面污染物质沉积量会呈现出显著降变和涨落．美国“MSX”航天器巧遇太阳活动第23周双峰年和超低活动程度年份（2008—2010年）状况，峰年期间航天器表面污染物质沉积量呈显著降变，沉积层厚度降变约为8 nm，而且不同气流方向上QCM监测得到的降变值均相近，说明这种变化的控制因子具有全向性作用和长期变化性（如太阳活动周期）．初步分析结果表明可能与中轨道高度上高能粒子尤其是质子日均通量强弱呈相应的相关关系，但也有待做更深入的机理分析和进一步验证大量探测数据．

3）航天器长期在轨运行的中后期，航天器出气速率明显下降，在遇到空间环境剧烈扰动期间，高能质子通量和太阳紫外辐射强度等会同时起作用，航天器表面污染物质沉积量呈微弱增变和涨落现象．

参考文献（References）

[1] Tribble A C，Boyadjian B，Davis J，et al. Contamination control engineering and design guidelines for the aerospace community-results，AIAA-1996-4375 [R]. Reston：AIAA，1996.

[2] Arnold G S. Spacecraft contamination model development [J]. SPIE，1998，3427：272-289.

[3] Barengoltz J. Molecular and particulate contaminants-a contamination data base within environment，AIAA-1988-0014 [R]. Reston：AIAA，1988.

[4] Tribble A C. The space environment：implications for spacecraft design [M]. Princeton：Princeton University Press，1995：183.

[5] Thomas B S，Graham S A，David F H，et al. Photochemical spacecraft self-contamination：laboratory results and system impacts [J]. Journal of Spacecraft and Rockets，1989，26（5）：358-367.

[6] Lorenz R D. Solar array degradation by dust impacts during cometary encounters [J]. Journal of Spacecraft and Rockets，1998，35（4）：579-582.

[7] Bedingfield K L，Leach R D，Alexander M B. Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment，NASA RP-1390 [R]. Alabama：MSFC，1996.

[8] Tribble A C，Haffner J W. Estimates of photochemically deposited contamination of the GPS satellites [J]. Journal of Spacecraft and Rockets，1991，28（2）：222-228.

[9] 廖少英．飞行环境污染对航天器的影响 [J]．上海航天，2002（6）：29-32.
Liao S Y. The effect of flight environment contamination to spacecraft [J]. Aerospace Shanghai，2002（6）：29-32（in Chinese）.

[10] Rogers J F. AST-6 quartz-crystal microbalance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems，1975，AES-11（6）：1185-1186.

[11] Naumann R J. Skylab induced environment，AIAA-1974-1225 [R]. Reston：AIAA，1974.

[12] Wood B E，Hall D F，Lesho J C，et al. Midcourse space experiment satellite flight measurements of contamination on quartz crystal microbalance [J]. Journal of Spacecraft and Rockets，1998，35（4）：533-538.

[13] Mill J D，Romick G J，Uy O M，et al. Midcourse space experiment：introduction to the spacecraft，instruments，and scientific objectives [J]. Journal of Spacecraft and Rockets，1994，31（5）：900-907.

[14] Uy O M，Benson R C，Erlandson R E，et al. Contamination lessons learned from midcourse space experiment [C] // Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering. Californa：SPIE，1998，3427：28-43.

[15] Wood B E，Bertrand W T，Lesho J C，et al. Midcourse space experiment（MSX）satellite measurements of contaminant films using QCMs-5 years in space，AIAA-2001-2956 [R]. Reston：AIAA，2001.

[16] Wood B E，Hall D F，Lesho J C，et al. On-orbit midcourse space experiment（MSX）satellite environment flight experiments，AIAA-1999-0252 [R]. Reston：AIAA，1999.

[17] 唐萍，侯建文，朱光武，等．航天器表面沉积污染物质质量探测 [J]．中国科学：技术科学，2014，44（3）：280-285.
Tang P，Hou J W，Zhu G W，et al. Detection of spacecraft surface contamination deposition [J]. Scientia Sinica：Technologica，2014，44（3）：280-285（in Chinese）.

[18] Wood B E，Bertrand W T，Uy O M，et al. Review of midcourse space experiment（MSX）satellite QCM contamination results after 8 years in space，AIAA-2005-67 [R]. Reston：AIAA，2005.

Changes of contamination deposition on spacecraft surface and evaluation of control factors

TANG Ping[1,2], ZHU Guangwu[*1], QIN Guotai[1], LI Yongping[1], HE Yumei[1]

(1. Centre for Space Science and Application Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: After spacecraft launched into space environment, molecule contamination and tiny particle contamination deposit on spacecraft surface and constitute the surface contamination layer. This contamination phenomenon has different levels of negative impacts on some technical systems. The on-orbit detection results of spacecraft surface contamination both in China and abroad were discussed. Surface contamination deposition changes and control factors were preliminarily evaluated. The result shows that deposition changes of surface contamination within the first 1 to 2 years after launch are controlled by the spacecraft outgassing mass by itself, outgassing rate, spacecraft surface temperature and air flow direction. The deposition mass within early period is larger, which is controlled by more surface outgassing by spacecraft itself within early period and higher deposition rate after launch. And the deposition mass is more in the ram area than in the yield area. The surface deposition in the later period shows obvious drop or slow fluctuations, and possesses omnidirectional characteristics. Some control factors with omnidirectional effect were discussed, among which high-energy particle flux and solar ultraviolet radiation flux may be the main control factors.

Key words: quartz crystal microbalance; spacecraft surface contamination; mass deposition; midcourse space experiment (MSE) satellite; high-energy particle flux